

**Г.М. СУЧКОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

**С.Н. ГЛОБА**, канд.техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

### **ЕМА ДЕФЕКТОСКОПІЯ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ. (Огляд)**

Проаналізовано літературні джерела з питань електромагнітно-акустичного контролю якості виробів і матеріалів. Визначена ніша, в якій цей метод має свої переваги перед традиційним контактним методом. Встановлено недоліки ЕМА методу та шляхи зменшення їх впливу.

References on questions elektromagnetic acoustic testing of products and materials are analysed. The niche in which this method has the advantages before a traditional contact method is defined. Imperfection of EMA method and a way of reduction of their influence are established.

В даний час відзначається бурхливий розвиток методів і засобів неруйнівного контролю матеріалів та виробів [1-2]. Переважно це прилади, що реалізують метод контролю з використанням контактної рідини. У той же час були визначені області [3], в яких застосування контактних методів контролю недостатньо ефективно. Це контроль виробів з забрудненої поверхні без спеціальної зачистки, дефектоскопія гарячих і холодних виробів, дефектоскопія з низькими експлуатаційними витратами і т.д. Тому в останні роки спостерігається інтенсифікація досліджень і розробок у напрямі створення засобів оцінки якості виробів безконтактними способами. Найбільші технічні успіхи в зазначеному напрямку досягнуті за рахунок застосування електромагнітної - акустичного (ЕМА) способу збудження і прийому ультразвукових коливань [1, 3-108]. Застосування ЕМА дефектоскопії виправдане і з економічної точки зору. Судакова К.В. [109] повідомляє, що впровадження суцільного автоматичного ультразвукового безконтактного контролю на ВАТ «Северсталь», при середній вартості установки 30 млн. руб. РФ та витрат на експлуатацію приблизно 10% в рік від цієї вартості, окупається всього за 8 місяців. Подальша експлуатація установки дає економічний ефект близько 105 млн. руб. на рік за рахунок підвищення якості продукції, що випускається, продуктивності контролю і виключення зачистки виробів, витрати на яку складають близько 550 руб./т.

#### **Можливості ЕМА способу неруйнівного контролю.**

При дефектоскопії з застосуванням ЕМА способу використовують переважно два методи контролю - імпульсний і резонансний [1, 5, 20]. Для реалізації імпульсного методу в основному застосовують ті ж електронні блоки [32], що й у традиційних ультразвукових приладах, в яких збудження і прийом звуку здійснюється за допомогою п'єзоперетворювача [33]. Відмінність полягає в тому, що замість п'єзoeлемента використовується котушка індуктивності та є пристрій для збудження поляризованого магнітного поля. Живлять ЕМА перетворювачі (ЕМАП), як правило,

генераторами ударного збудження [24-25, 34-36]. Необхідну величину індукції поляризовуючого магнітного поля створюють різними пристроями, конструкція яких залежить від конкретної задачі [17]. Найбільше різноманіття мають прилади, що реалізують ЕМА перетворення з допомогою електродинамічного механізму [17, 32]. У цьому випадку напрямки сили в поверхневому шарі металу неважко визначити, а, отже, можна вирахувати ряд параметрів сформованого акустичного поля [1]. Для більшої ефективності ЕМА перетворення за допомогою електродинамічного і індуктивного механізмів, крім збільшення амплітуди електромагнітного поля, доцільно збільшити величину індукції поляризовуючого магнітного поля [32], тому що коефіцієнт подвійного ЕМА перетворення (режим випромінювання - прийом) залежить від її величини квадратично [37]. Однак мінімальне магнітне поле, при якому можна спостерігати трансформацію електромагнітних хвиль у пружні, навіть у такому металі як алюміній (ефективність зворотного перетворення пропорційна щільності металу), перевищує  $1,5 \times 10^5$  А/м. Вважається, що для впевненої роботи ЕМА дефектоскопа необхідні магнітні поля з напруженістю близько  $10^6$  А/м і більше. Такі напруженості створити непросто. Тому було запропоновано замінити постійне поляризовує магнітне поле імпульсним [38]. Тривалість імпульсу поляризовуючого поля вибрана такою, щоб була забезпечена сталість його амплітуди на проміжок часу між посилкою зонduючого імпульсу і приходом сигналу, відбитого з об'єкта контролю (ОК).

На відміну від імпульсного, резонансний метод апаратно реалізується простіше [32, 39]. Але він застосований для дуже обмеженого числа виробів [39]. Його показання залежать від впливу навколишнього середовища та умов проведення вимірювань [1, 39]. Часто показання контрольної апаратури неоднозначні і потрібні багаторазові вимірювання [39]. Цей метод інтегральний, що вкрай ускладнює (або робить неможливою) локалізацію внутрішніх несущісностей контрольованого виробу. Тому переважно практичне застосування знаходить імпульсний метод контролю.

До недоліків імпульсного методу слід віднести [1, 32]: відносну складність обладнання, застосування потужного спеціального генератора імпульсів струму, роботу з високою напругою, необхідність більшого посилення високочастотного сигналу (коефіцієнт посилення понад  $10^6$ ), у ряді випадків потрібно імпульсне поляризує поле. Однак, останнім часом, саме цей метод найбільш широко застосовується авторами в роботах, присвячених ЕМА перетворенню [1, 4-29, 40 - 41]. Він може бути орієнтований на вирішення завдань з виявлення порушень суцільності [5, 13, 42], товщинометрії [18-19, 21, 43-44], вимірювання величини зерна в металі [1], і т. п. в частотному діапазоні  $f = 0,1 \dots 30$  МГц. Можливо також застосування ЕМА способу для частот до 100 МГц [45].

Експериментальними і теоретичними дослідженнями встановлено, що ЕМА способом у металах успішно збуджуються і реєструються імпульси всіх

відомих типів пружних коливань [1, 15 - 17, 31, 40-41]. Порушуються і приймаються об'ємні поздовжні [1, 6, 46] і зсувні коливання [1, 3-9, 17, 29, 47] нормально поверхні металу (з будь-якою орієнтацією вектора поляризації [1, 17], включаючи кругову [17, 48]), об'ємні поздовжні і зсувні коливання під будь-яким кутом до поверхні [49-50], в тому числі зсувні з вертикальною [24] і горизонтальною [17, 31] поляризацією. Суттєва перевага для неруйнівного контролю та вимірювань дає ЕМА спосіб за рахунок високоефективного збудження і прийому хвиль Релея [10-12, 14, 30, 51], нормальних [31, 52-53] і крутильних хвиль [54] «вертикальною» і «горизонтальною» поляризацією.

ЕМА спосіб дозволяє збуджувати і приймати відбиті від дефектів пружні імпульси в різних виробках [9]. Так, з 1983 р. ведеться дефектоскопія дзеркально - тінювим методом загального обсягу виробництва рейок на ВАТ «Кузнецкий металургійний комбінат», ВАТ «Нижньотатільський металургійний комбінат», ВАТ «Маріупольський МК «Азовсталь» в перерізі, обмеженому товщиною шийки [4-5, 27], перетину головки рейок на ВАТ «Кузнецкий металургійний комбінат» [20, 96]. Здійснено спробу контролю феромагнітних стрижнів [55], труб [12, 28, 56-57], сепараторів підшипників [25], листового прокату [58], заготовок круглого перерізу [26] та інших виробів [1], виготовлених зі сталі [4, 9, 26, 28, 39, 42, 57], чавуну [9], алюмінію [9, 36], сплавів на основі міді і титану [1, 9, 59], композитних матеріалів [60] і т.п. Перевага ЕМА способу проявляється при контролі матеріалу в гарячому стані. Принципова можливість безконтактного ультразвукового контролю «гарячих» ( $500^\circ\text{C}$  і вище) феромагнітних виробів була встановлена в роботі [61]. Подальші дослідження [46] показали, що збудження і реєстрація поздовжніх хвиль у матеріалах при температурі Кюрі відбувається за рахунок явищ об'ємної магнітострикції і магнітопружного ефекту. Незважаючи на значну кількість робіт у цьому напрямку [6, 62-66], даних про ефективно працюючих в промисловості ЕМА установок в літературі не виявлено.

Слід зазначити, що ЕМА способом реалізуються всі відомі методи контролю - тінювий [1], дзеркально - тінювий [5], метод відлуння [8], відлуння - наскрізний [58], дифракційно - часовий [11] та ін. Найбільш складні проблеми мають місце при використанні контролю ЕМА способом методом відлуння. За даними [40] його чутливість в 10000 разів менше, ніж контактним методом, за даними [68] - менше на 50 дБ, а за даними [69] - на 100 дБ. За результатами досліджень [70] коефіцієнт перетворення електричної енергії в акустичну складає  $10^{-3}$ . У той же час в роботі [71] стверджується, що ЕМА способом виявляються плоскодонні відбивачі діаметром 1,3 мм, а в [8] експериментально виявляли дискові відбивачі діаметром 0,9 мм на відстані 170 мм в сталі типу У7. Це відповідає умовній чутливості п'єзоперетворювачів.

Особливо ефективно використання ЕМА способу при застосуванні хвиль Релея і нормальних хвиль. Так у роботах [10-12, 28, 30-31, 72] такими

хвилями досліджені дефекти у вигляді рисок на поверхні труб. Автори стверджують, що вдається виявляти моделі дефектів глибиною 10% або навіть 5% від товщини стінки труб. Однак даних по дослідженню заданого діапазону глибин дефектів не наводиться. В роботі [73] наведені відомості про виявлення хвилями Лемба моделей дефектів у вигляді наскрізних отворів в листах діаметром 8 мм. Ці дані підтверджують низьку чутливість ЕМА способу. Але, з іншого боку, в роботі [74] стверджується, що при ширині змінних решіток ЕМАП рівною 30 мм впевнено виявлялись дефекти типу наскрізного свердління діаметром 1 мм у листі товщиною 1 - 2 мм на відстані до 250 мм. Крім цього, залежність амплітуди відлуння сигналу від глибини ризику в інтервалі 0,1-0,6 мм - лінійна, що вигідно відрізняє її від аналогічних залежностей, для контактних датчиків.

Подібним проблемам присвячена робота [35]. Показано, що ширина  $l$  провідника решітки перетворювача повинна вибиратися з умови  $l \ll \lambda/6$ , а його висота не повинна перевищувати 2 мм. При дослідженні залежності амплітуди відлуння-сигналу від величини поля підмагнічування виявлено лінійне зростання оптимальної індукції поля з товщиною листа. Розглянуті ЕМАП, при відлуння-методі контролю, виявляли дефекти у вигляді наскрізного свердління діаметром 1 мм на відстані 300 мм, або у вигляді ризику глибиною понад 10% від товщини листа на відстані до 200 мм. Встановлена лінійна залежність амплітуди відлуння сигналу від амплітудно значення струму генератора (0-7 А), що свідчить про сталість коефіцієнтів ЕМА перетворення. У роботах [10-12] експериментально встановлена можливість виявлення тріщин на поверхні труб і рейок глибиною більше 0,2 мм. При дослідженнях зачистку поверхні катання не виконували.

Автори роботи [75] ЕМАП приймали поверхневі хвилі, які збуджували звичайним п'єзоелектричним похилим випромінювачем у сплаві Д16 і сталі. Відзначено, що прийом цих хвиль в двох точках зразка виключає вплив умов введення та перехідною середовища на результати вимірювань і дає можливість контролювати вали, лопатки турбін, деталі літаків і т. д. Це підтверджує високі експлуатаційні характеристики ЕМА перетворювачів.

В роботі [76] досліджувались параметри ЕМА дефектоскопу для контролю нормальними хвилями феромагнітних листів і труб. Виявлено, що за будь-якої орієнтації магнітного поля не відбувається додаткового загасання ультразвуку, обумовленого наявністю магнітного поля. Суперечать цьому висновку результати роботи [77], де відзначається, що характер і величина загасання ультразвуку в феромагнетиках в присутності постійного магнітного поля істотно залежать від розмірів зерна феромагнітних матеріалів.

Температурна залежність амплітуди поверхневої хвилі, збудженої в зразку з низьковуглецевій сталі, вивчена в роботі [78]. Стенд для проведення випробувань містив охолоджуємий водою електромагніт і мідний екран, в якому розміщувалися приймальна та передавальна решітки з платинового дроту діаметром 0,5 мм, які були розміщені в керамічну форму. Індукція

поляризує магнітного поля складала 0,3 Тл. Струм в решітці збуджуючого перетворювача на частоті 250 кГц сягав 600 А. Встановлено, що, як і у випадку з об'ємними повздовжніми хвилями, амплітуда сигналу різко зростає в точці Кюрі досліджуваного матеріалу. Автор пов'язує це із зосередженням магнітного поля в поверхневому шарі зразка, охолодженого до температури Кюрі.

Автори робіт [17, 73] досліджували вплив форми поверхні виробу на спрямованість акустичного поля, зформованого ПЕП і ЕМАП. Якісний аналіз форми акустичних полів в променевому наближенні дозволив їм зробити наступні висновки. Опукла поверхня є дефокусуючим фактором для ПЕП і фокусується фактором для ЕМАП. Спрямовані властивості ЕМАП у випадку контролю виробів з опуклих криволінійних поверхонь краще, ніж у неспрофокусованих ПЕП такого ж хвильового розміру. Це визначає підвищену чутливість ЕМАП до дефектів в центральній зоні об'єкта контролю.

Вплив відхилення осі симетрії перетворювача від нормалі до поверхні ОК досліджено в роботах [4, 73, 79]. Для ПЕП центральний промінь у виробі відхилитися від нормалі на певний кут. Це призведе до відхилення всіх інших променів ультразвукового пучка в металі від їх номінального положення. Легко визначити, що для випадку вода-сталь відхилення центрального променя у воді всього на  $5^\circ$  від нормалі призведе не тільки до його заломлення в металі на кут майже  $20^\circ$ , а й до появи трансформованої поперечної хвилі. При цьому периферійні промені ультразвукового пучка можуть трансформуватися в поверхневу хвилю. Ці явища можуть стати причиною виникнення завад у вигляді паразитних відбиттів, не пов'язаних з наявністю несутцільностей в матеріалі. Оскільки ЕМАП породжує ультразвукову хвилю частиною самої поверхні ОК, то відхилення його вісі симетрії від нормалі практично не позначається на формі створюваного їм ультразвукового пучка. З викладеного випливають такі висновки: зрушення і нахили робочої площини ЕМАП не впливають на напрям прозвучування [17, 26], тобто максимум діаграми спрямованості завжди проходить через осьову зону прутка або заготовки круглого перерізу.

Аналіз порівняльних можливостей прямих ЕМАП поздовжніх і поперечних хвиль з різною поляризацією наведений авторами робіт [4-5, 7, 80-81]. При точній орієнтації та фокусуванні ПЕП, а також при застосуванні ЕМАП обидва пристрої здійснюють введення та отримання ультразвуку в напрямку, переважно перпендикулярному до поверхні. Однак ЕМАП і в цьому випадку можуть мати певні переваги, зумовлені наступним. ПЕП дозволяє збуджувати і приймати по нормалі до поверхні металу тільки поздовжні коливання, а ЕМАП (в залежності від конструкції) - як поздовжні, так і поперечні. В останньому випадку збудження і прийом поперечних хвиль, що розповсюджуються по нормалі до поверхні, особливо ефективно може бути здійснено при контролі феромагнітних матеріалів. Встановлені наступні переваги, зумовлені застосуванням поперечних хвиль, збуджених

нормально поверхні виробу [1, 4-9, 11-13, 14, 17, 20, 29, 40, 59, 67, 82-83]:

1. Збільшується чутливість контролю, зменшується величина «мертвої» зони і роздільна здатність, підвищується точність вимірювання координат дефектів і товщини виробу. Це зумовлено тим, що швидкість поширення поперечних хвиль в матеріалах майже в 2 рази менше швидкості поздовжніх хвиль.

2. Поперечна хвиля краще відбивається від плоских дефектів, заповнених газом, рідиною або сипучою речовиною, так як такого роду несущільності погано передають зсувні напруги.

3. Поперечна хвиля при правильному виборі напрямку поляризації не дає суттєвої трансформації при відображенні від дефекту і поверхні ОК. Це дає можливість зменшити вплив на результати контролю когерентних акустичних завад.

4. Амплітуда імпульсів поперечних коливань, збуджених прямим ЕМАП, послаблюється в виробі з плоскими тріщинами, орієнтованими перпендикулярно поверхні ОК, більшою мірою, ніж амплітуда поздовжніх коливань, збуджених прямим ПЕП. Це створює передумови для успішного виявлення несприятливо орієнтованих дефектів плоскої форми.

5. У порівнянні з поздовжньою поперечна хвиля менше затухає в матеріалі виробу.

Для кожного з розглянутих типів перетворювачів (ПЕП або ЕМАП) характерні специфічні завади [83]. Як було показано раніше [3], для ПЕП велика частина такого роду завад пов'язана зі станом акустичного контакту та якістю поверхні ОК. Ці перешкоди не характерні для пристроїв з ЕМАП. Для них не підходить і термін «акустичний контакт». Більш того, в акустичному контакті немає ніякої необхідності, оскільки ультразвук збуджується в тонкому поверхневому прошарку ОК. Однак абсолютно необхідна наявність електромагнітного контакту з поверхнею контрольованого виробу. Тому навіть тонкий електропровідний матеріал, внесений в зазор між ЕМАП і ОК, є електромагнітним екраном і здатний частково або повністю виключити збудження ультразвуку в ОК. Цим явищем пояснюється висока чутливість ЕМАП до різних дефектів поверхні: польон, закатів, тріщин і т. д. В той же час в роботі [4] показано, що мідна фольга товщиною 0,1 мм послаблює амплітуду корисного сигналу всього в 2 ... 3 рази. Автор використовував пластини мідної фольги для створення імітаторів дефектів при дзеркально - тіньовому методі контролю. Встановлено також, що щільно прилягаюча окалина не заважає проведенню УЗК [21, 83]. Навпаки, будучи діелектриком і маючи гарні магнітні властивості, окалина посилює електромагнітний зв'язок ЕМАП з поверхнею ОК. Однак шматочки вільної відшарованої окалини, що потрапляють в зазор між ЕМАП і ОК, здатні створити завади амплітудою більш 60 дБ [4]. Під впливом електромагнітного імпульсу і поляризуючого магнітного поля вони пружно деформуються. Збуджуються механічні коливання, які можуть бути прийняті разом з корисним сигналом, будучи з

ним суттєвою мірою когерентними. На можливість контролю сталевих виробів, покритих шаром окалини, вказується також в роботі [84]. Автори стверджують, що пряме і зворотне ЕМА перетворення здійснюється за рахунок магніострикційних властивостей магнетита  $Fe_3O_4$ , що входить до складу окису заліза. Це твердження суперечне, оскільки в залежності від товщини та інших характеристик окалини в процесі ЕМА перетворення можуть брати участь одночасно і метал і окалина. В нормативних документах і роботах [4, 73, 85 - 87] вказується на необхідність обов'язкового видалення відлущеної окалини, а також врахування товщини окалини при розробці засобів контролю ЕМА способом. При малих поляризуючих магнітних полях також виявлено збудження пружної хвилі в залізі за рахунок магніострикційних властивостей окалини. Воно різко припиняється при температурі 400° і вище [84].

При контролі виробів складної форми часто буває необхідно вводити ультразвук похило. Ряд робіт присвячено вирішенню питання про створення відповідних ЕМА перетворювачів. А.В. Малінка [88] досліджував зразки ЕМА датчиків, які підтвердили висловлену їм можливість збудження УЗ коливань під кутом і залежність кута введення та прийому від частоти ультразвукових коливань. Зміна кута вводу від частоти спостерігалася в діапазоні 14-25 ° на частоті 2,5 МГц для зразків із сталі марки ст. 3 товщиною 10 - 50 мм. Подальші дослідження були проведені авторами робіт [24, 30, 89-92] та іншими. Однак до теперішнього часу в літературних джерелах не виявлено повідомлень про ефективне застосуванні в промисловості дефектоскопів, що використовують ЕМА перетворювачі для виявлення внутрішніх дефектів виробів, які збуджують ультразвукові імпульси під кутом до поверхні.

Можливість ЕМАП збуджувати і приймати зсувні коливання нормально поверхні виробу з будь-яким напрямком вектора поляризації ставить кілька різнопланових завдань. Дослідити особливості виявлення дефектів виробів, зумовлені заданою орієнтацією вектора поляризації пружних коливань. Узаконити в нормативно-технічній документації напрямок вектора поляризації, як один з основних параметрів контролю. Цей висновок впливає з таких результатів досліджень. Авторами робіт [4, 80-81] було визначено експериментально, що в деяких випадках спостерігається підвищена виявляємість внутрішніх дефектів при дефектоскопії лінійно - поляризованими коливаннями. В роботі [7] теоретично доведено та експериментально підтверджено, що при взаємноперпендикулярній орієнтації вектора поляризації щодо найбільшої вісі розвитку дефекту амплітуда інформаційного відлуння сигналу може змінюватися на 6-8 дБ. Тому вплив цього параметра контролю було враховано у нормативно-технічній документації на контроль [87].

#### **Застосування ЕМА способу для дефектоскопії виробів.**

Як і слід було очікувати, значна частина робіт по ЕМА дефектоскопії

була присвячена контролю «складних» виробів [4-6, 10-11, 13, 20, 24-28, 31, 39, 47, 57-58, 66, 72, 84 -87, 93]. До таких ОК відносяться рейки, які мають складну форму. Їх поверхня часто забруднена окалиною, іржею, маслом і т.п. Були здійснені кроки з організації їхнього контролю у залізничній колії [24, 94] та в умовах виробництва [4-5, 27]. Критерієм виявлення дефекту було або зменшення амплітуди донного сигналу до певної величини, або реєстрація відбитого від дефекту відлуння, які перевищували поріг обмеження. Випробування приладів показали ефективність УЗ контролю рейок ЕМА способом на забруднених ділянках шляху, а також при швидкостях контролю більших, ніж при контролі з п'єзоелектричним шукачем. З останніх розробок слід відзначити описаний в [24] однопоточний дефектоскоп для контролю рейок в колії. В приладі використовують три типи ЕМА перетворювачів - прямі (зсувні хвилі) похилі (зсувні SV хвилі) і перетворювач поверхневих хвиль. Зазор між ЕМАП і рейкою не перевищує 1 мм. На жаль, автори не вказали, що ж виявляє розроблений прилад. Слід зазначити, що Західно-Європейське співтовариство запланувало розробку вагона-дефектоскопа, в якому будуть застосовуватися ЕМА перетворювачі [95].

Значно ефективніше використання ЕМАП в умовах виробництва [4-5, 27, 96]. З 1983 р. до теперішнього часу здійснюється автоматичний контроль зони рейки, обмеженої товщиною шийки, дзеркально - тінювим методом на швидкості до 2 м/с (проконтрольовано більше 70 млн. тонн рейок). Критерієм дефектності служить послаблення другого донного імпульсу на 10-14 дБ (на ВАТ «Кузнецкий металургійний комбінат» і ВАТ «Нижньотатільський металургійний комбінат») і першого донного імпульсу на 8-10 дБ (ВАТ «Меткомбінат» «Азовсталь»). Технологія контролю розроблена автором роботи [4] і докладно описана в [85 - 87]. Сучасний стан ЕМА контролю зони шийки і головки рейок на ВАТ «Кузнецкий металургійний комбінат» охарактеризований в [27, 96-97].

Останнім часом ведуться інтенсивні роботи над установкою для ЕМА дефектоскопії рейок, що були в експлуатації, на рейкозварювальних підприємствах [98]. Зазор між робочою поверхнею ЕМАП і поверхнею катання головки рейки становить 1 мм. (В установці ЕМА дефектоскопії рейок на ВАТ «Кузнецкий меткомбінат» [4] повітряний технологічний зазор досягав 10 мм). Для оптимального виявлення дефектів у роботі [98] прийнята схема прозвучування рейки, що базується на 5-ти ЕМАП. Використовується відлуння - імпульсний і дзеркально - тінювий методи контролю. В установці УД - ЕМА – РСР-01 перетворювачі релеєвських хвиль працюють на частотах 0.5 і 0.2 МГц. Глибина контролю ними являється рівною, відповідно, 2,6 і 6,5 мм. У цій же роботі повідомляється, що в ході дослідно-промислової експлуатації установкою УД-ЕМА-РСР-01 на РСР-21 проконтрольовано понад 60000 погонних метрів рейок. Всього виявлено 325 дефектів. За повідомленням Горделія В.І. дефектоскопом АВІКОН-01 в тих же рейках було виявлено лише 181 дефект. На недоліки контактного методу контролю

рейок в дорозі вказують і дані зам. міністра МШС РФ Акулова М. П. [110]. «В 2002 г. из-за некачественного контроля допущено 195 изломов рельсов под поездами. Причем имеются случаи пропуска поперечных контактно-усталостных трещин после 13 - кратной проверки рельса обычными дефектоскопами! Несмотря на заверения разработчиков и поставщиков перечисленных новых средств контроля об их высоких характеристиках уже в первом квартале 2003 г. допущено увеличение количества изломов рельсов под поездами на 37% по сравнению с 2002 г.» Наведені результати підтверджують високу ефективність ЕМА способу контролю в порівнянні з традиційним контактним.

ЕМА спосіб може застосовуватися для контролю непрочоків в з'єднаннях метал - неметал [99]. Виявляються дефекти площею досить значного розміру ( $1 \text{ см}^2$  і більше на глибині до 50 мм) при продуктивності в автоматичному режимі 13-15  $\text{м}^2$  поверхні виробу на годину. Ці дані підтверджують високу продуктивність ЕМА контролю.

Розроблені приставки до дефектоскопів типу ДУК-66, ДУК-6В, УД-10УА [100], призначені для використання імпульсного методу контролю відлунням на робочій частоті 2,5 МГц з імпульсним підмагнічуванням. Вони виявляють дефекти, еквівалентні свердлінню діаметром 5 - 10 мм на глибині до 120 мм. Повідомлень про промислове застосування цих пристроїв у літературних джерелах не виявлено.

В роботі [101] чутливість ЕМА способу підвищувалася за рахунок використання форми контрольованого виробу. У заготовці круглого перерізу за рахунок збудження акустичних коливань на ділянці поверхні, що дорівнює радіусу ОК, акустичне поле концентрується в її центрі. Відношення амплітуди відлуння від свердління діаметром 1,5 мм і довжиною 20 мм на вісі заготовки до амплітуди донного сигналу (за відсутності дефекту) дорівнює 0,3-0,4. Обмеження такої методики обумовлено тим, що амплітуда відлуння сигналу від такого ж точно штучного дефекту, але розташованого на відстані 10 мм від вісі заготовки, на порядок менше відлуння сигналу від центрального свердління. У той же час така методика контролю часто виправдана, тому що в значній кількості виробів переважна частина дефектів концентрується в його центральній частині.

У Челябінському політехнічному інституті був розроблений дефектоскоп ДУКЛА-1 [50] для автоматизованого контролю якості крайніх ділянок листа - заготовки для електрозварних газопровідних труб діаметром 1220 мм. Реалізовано тінювої метод контролю при швидкості до 5 м/с. Максимальна товщина прокату - 100 мм (сталь 17ГС). Виявляються дефекти еквівалентні розшарування площею  $15 \text{ мм}^2$  і більше.

Здійснені спроби створення дефектоскопів для контролю якості гарячого прокату [102]. Перша система такого типу було випробувана в 1973 р. на Челябінському трубопрокатному заводі в цеху з виробництва гарячекатаних труб. В основі її роботи лежить ефект аномального збільшення коефіцієнтів

прямого та зворотного ЕМА перетворення в феромагнетиках в районі температури Кюрі. Як повідомляється в [103] англійська компанія «Tube Investments Ltd.» Успішно експлуатує системи для контролю гарячого прокату при температурах до 750°C. Використовуються ЕМАП з електромагнітом, який охолоджується водою, на робочій частоті 1,4 МГц. Збуджуючу котушку живлять імпульсами напруги величиною 5 кВ. Зазор між виробом і ЕМАП складає 0,5 мм. Автори стверджують, що система впевнено виявляє дефекти типу стрічкових включень довжиною до 100 мм при швидкості руху контрольованого виробу 10 м/с.

Для забезпечення стабільних умов при проведенні ЕМА контролю застосовують різні способи [4, 104], які усувають вплив на результати контролю похибки через випадкові зміни величини зазору між ЕМАП і поверхнею контрольованого ОК. Для цього вимірюють резонансні частоти  $f_c$  і  $f_0$  ЕМА перетворювача в відсутність виробу, і при його встановленні над стандартним зразком з номінальним зазором. Збільшують зазор на задану величину, яка визначається особливостями стежучої механічної системи. Вимірюють при цьому величину  $\Delta f$  ЕМАП, а частоту  $f_p$  заповнення зондуючих імпульсів струму вибирають з умови  $f_c < f_p < f$ . Встановлюють номінальний робочий зазор і частоту живлення перетворювача так, щоб амплітуда інформаційного сигналу була максимальною. Встановлюють максимальну умовну чутливість. В результаті зміни зазору між перетворювачем та поверхнею контрольованого виробу в заданому діапазоні не будуть впливати на результат контролю.

Для вирішення аналогічної задачі за методикою [105] встановлюють зазор між резонансним ЕМАП, який живлять радіоімпульсами струму, і виробом, збуджують об'ємні ультразвукові імпульси цим перетворювачем, беруть відбиті імпульси і вимірюють їх амплітуди. З метою підвищення чутливості дефектоскоп, попередньо, перед встановленням робочого зазору, реєструють залежність амплітуди відображених імпульсів від зазору між перетворювачем та виробом і встановлюють робочий зазор відповідним максимальному значенню амплітуди відображених імпульсів. Такі технологічні прийоми доцільно застосовувати при контролі ЕМА способом.

Аналіз відомих робіт [1, 3-108] дозволив встановити наступне. Має місце достатньо велика кількість розробок і досліджень, а ефективно працюючих портативних приладів для ЕМА дефектоскопії виробів і матеріалів на ринку практично немає. Було встановлено, що основною причиною, яка стримує розробку ефективних ЕМА дефектоскопів, є традиційний підхід до їх побудови. Багато вдалих технологічних та технічних рішень, отриманих при розробці та експлуатації автоматичних дефектоскопічних установок і товщиномірів [2, 11, 25-26], найчастіше використовувати неможливо. З огляду на тенденції розвитку ЕМА дефектоскопів [106-108] і товщиномірів [30], були сформульовані відповідні задачі та проводяться теоретичні [111-122] і практичні [19, 22] роботи з покращення характеристик ЕМА приладів.

Частково вирішені проблеми, пов'язані з підвищенням чутливості і зменшенням «мертвої зони» контролю.

### Висновки

1. ЕМА дефектоскопи і товщиноміри є економічно високоефективними засобами, які доповнюють групи традиційних установок, приладів і пристроїв, що використовують контактний варіант контролю.

2. Встановлено, що для підвищення чутливості засобів ЕМА контролю до рівня традиційних приладів необхідно: перейти від ударного збудження до живлення ЕМА перетворювачів пакетними імпульсами струму; формувати інформаційний імпульс з індивідуальними ознаками - частотою заповнення, тривалістю, амплітудою, орієнтацією вектора поляризації і фазою; виділяти інформаційний сигнал з урахуванням сформованих раніше індивідуальних ознак; застосовувати кореляційні та інші методи обробки прийнятої ЕМАП інформації.

3. Для підвищення чутливості ЕМА приладів їх необхідно забезпечувати полосовими генераторами пакетних імпульсів струму, полосовими ЕМАП, фільтрами та підсилювачами, аналоговими або цифровими корелятором або аналогічними засобами обробки інформації.

4. Показана технічна здійсненність високоефективних «ручних» приладів для контролю ЕМА способом, з використанням методу відлуння, металовиробів в нагрітому і нормальному стані з високою чутливістю, незначною «мертвою зоною», високою продуктивністю.

**Список літератури:** 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 2. Патон Б. Є., Троїцький В. О., Посипайко Ю.М. Неруйнівний контроль в Україні // Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. 2003. № 2(18). С. 5-9. 3. Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА способа // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 67-70. 4. Сучков Г.М. Разработка и внедрение технологии сплошного автоматического обнаружения дефектов макроструктуры объемнозакаленных рельсов бесконтактным ультразвуковым методом. -Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук.- Харьков: ХАДИ, 1988.- 22 с. 5. Себко В.П., Сучков Г.М., Камардин В.М. Чувствительность ЭМА способа контроля железнодорожных рельсов ЗТМ // Дефектоскопия. 2004. № 3. С. 31 – 42. 6. Себко В.П., Сучков Г.М., Ищенко В.Н. Исследование факторов, влияющих на результаты контроля горячего металла ЭМА способом // Дефектоскопия. 2004. № 11. С. 40 - 49. 7. Сучков Г. М. Определение сечения рассеяния сдвиговых линейно поляризованных ультразвуковых колебаний с произвольной ориентацией вектора поляризации на длинном круговом цилиндрическом дефекте. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2000. №2. С. 3 – 9. 8. Сучков Г.М., Катасонов Ю.А., Гарькавый В.В. Экспериментальное исследование чувствительности ЭМА преобразователей при дефектоскопии эхо методом объемными сдвиговыми волнами // Дефектоскопия. 2000. №2. С.12-16. 9. Сучков Г.М. Исследование ЭМА способом выявляемости плоскостных отражателей в образцах из различных материалов // Контроль. Диагностика. 2002. № 5. С.50 - 51. 10. Сучков Г.М., Катасонов Ю.А. О практической применимости ЭМА преобразователей для дефектоскопии поверхности изделий сложной формы эхометодом. – Дефектоскопия. 1999. № 10 С. 15-19. 11. Себко В.П., Сучков Г.М., Горкунов Б.М. Новый способ обнаружения дефектов металлов с помощью электромагнитно – акустических преобразователей. – В сб.: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. № 1. С. 54-58. 12. Сучков Г. М., Катасонов Ю.А. Экспериментальные исследования

нового способа бесконтактной ультразвуковой дефектоскопии труб эхометодом // Дефектоскопия. 1999. № 11. С.77-80. **13.** Сучков Г.М., Михайлова И.В., Савон А.И. и др. Исследование несплошностей в листах // Дефектоскопия. 2001. № 3. С. 83 – 87. **14.** Себко В. П., Сучков Г.М. Новые возможности дефектоскопии рельсов. – Труды НТУ «ХПИ, Харьков, 2003, вып. 4. С. 87-90. **15.** Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом // Контроль. Диагностика. 2001. № 12. С. 36 – 39. **16.** Себко В.П., Сучков Г.М. Электромагнитно - акустический способ неразрушающего контроля. Часть 1. Эффект электромагнитно - акустического преобразования // Украинский метрологический журнал. 2003. Вып. 1. С. 35-38. **17.** Себко В. П., Сучков Г.М., Горкунов Б. М. Электромагнитно – акустический способ неразрушающего контроля. Часть 2. Электромагнитно – акустические преобразователи // Украинский метрологический журнал. 2003. Вып. 2. С. 20-25. **18.** Сучков Г.М. Разработка технологии и аппаратуры для ЭМА толщиномера // Контроль. Диагностика. № 11. 2001. С. 38-39. **19.** Ваврик Д.М., Сучков Г.М., Виноградов В. В. и др. Создание электромагнитно – акустического толщиномера для контроля тонкостенных труб // Дефектоскопия. 2002. № 10. С. 7-13. **20.** Себко В.П., Сучков Г.М., Малахов А.В. Ультразвуковой контроль головки рельсов ЭМА способом // Дефектоскопия. 2004. №7. С. 17-25. **21.** Сучков Г.М. Возможности современных ЭМА толщиномеров // Дефектоскопия. 2004. №12. С. 16-25. **22.** Сучков Г.М. Построение приборов для ультразвукового контроля и измерений с использованием ЭМА способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2005. № 2. С.36-39. **23.** Себко В. П., Сучков Г.М., Алексеев Е. А. Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий. - Дефектоскопия. 2002. № 12. С. 21 - 28. **24.** Тарабрин В.Ф., Бобров В.Т., Одынец С.А. и др. Однониточный ЭМА дефектоскоп для контроля рельсов. – В сб. 4 національна науково-технічна конференція і виставка “Неруйнівний контроль та технічна діагностика – 2003”. Київ. 2003. С. 318-320. **25.** Петров Ю.В. Контроль качества сепараторов подшипников качения подвижного ж.д. состава // Дефектоскопия. 1993. № 4. С.48-51. **26.** Кириков А.В., Забродин А.Н. Особенности применения ЭМАП при УЗК проката // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 1 (15). С. 5-8. **27.** Чабан С.В. Совершенствование неразрушающего контроля качества рельсов на Кузнецком металлургическом комбинате. - В сб. Материалы рельсовой комиссии – 99. - М.: ВНИИЖТ, 1999. С. 16 – 17. **28.** Шевченко С.Г., Иванов А.И., Драпкин А.И. Новая технология неразрушающего контроля качества труб. – В сб. Тезисы докладов второй украинской НТК по неразрушающему контролю и технической диагностике. – Днепрпетровск. 1997. С. 228 – 230. **29.** Сучков Г.М. Высокочувствительный электромагнитно – акустический преобразователь // Контроль. Диагностика. № 10. 2001. С. 30-32. **30.** Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения поверхностных волн при контроле ЭМА способом // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2000. № 3. С. 33-35. **31.** Никифорова Ж. Г., Булавин А.Н., Рокитро Б. И др. УЗК литых аустенитных труб с помощью ЭМА – преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 1. С. 22-23. **32.** Комаров В.А. Квазистационарное электромагнитно – акустическое преобразование в металлах. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. - 235 с. **33.** Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филипов и др. Под ред. В.В.Клюева. - М. Машиностроение, 2003. С. - 488. **34.** Буденков Г.А. Исследование методов бесконтактного ультразвукового контроля: Автореф. канд. дисс. Таганрог: Радиотехнический ин-т. 1972. - 22 с. **35.** Глухов Н.А. Исследование электромагнитно - акустических преобразователей для контроля изделий прокатного производства: Автореф. канд. дисс. Одесса: Политехн. ин-т. 1973. - 20 с. **36.** Самокрутов А.А. ЭМА толщиномер для авиакосмической промышленности. - Труды конф. 16-я российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика». - Санкт-Петербург, 2002, доклад 4.5.38. **37.** Шкарлет Ю.М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. - М.: Машиностроение, 1974. - 56 с. **38.** Шаповалов П.Ф. Исследование и разработка импульсных электромагнитно - акустических преобразователей и приборов для неразрушающего контроля: Автореф. дис. канд. техн. наук. Томск: Политехн. ин-т. 1973. - 21 с. **39.** Деордиев Г.И., Щербинин В.Е. Контроль массовых изделий резонансным электромагнитно – акустическим методом (обзор) // Дефектоскопия. 2004. № 1. С. 13 – 31. **40.** Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. - М: Машиностроение. 1981. - 240 с. **41.** Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практик. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И.

Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с. **42.** Бобров В.Т., Тарабрин В.Ф. Особенности обнаружения трещин болтовых отверстий рельсов сдвиговыми волнами, возбуждаемыми ЭМА преобразователями. - Труды конф. 16-я российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика». - Санкт-Петербург, 2002, доклад 1.19. **43.** Клюев В.В., Мужичук В.Ф., Безлюдо Г.Я. и др. Бесконтактный ультразвуковой толщиномер для измерения толщины стенки насоса – компрессорных труб // Контроль. Диагностика. 2002. № 4. С. 43-44. **44.** Карнаш О.М., Криничный П.Я., Виськов О.В. ЕМА – товщиномір з підвищеною чутливістю. - 36. наукових праць “Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів”. Вып. 6 – “ЛЕОТЕСТ-2001”. Київ-Львів. 2001. С. 38-41. **45.** Бойко М.С., Гуревич С.Ю., Уманец В.Н. ЭМА преобразователь для приема ультразвуковых колебаний // Дефектоскопия. 1989. № 5. С. 90 - 91. **46.** Гуревич С.Ю. К теории электромагнитной генерации акустических волн в ферромагнитной среде при высокой температуре // Дефектоскопия. 1993. № 3. С 37 – 50. **47.** Радько В.П. Преобразователи и приборы для неразрушающего контроля электромагнитно – акустическим методом. Результаты экспериментальных исследований // Бюллетень УТ НКДТ. № 1. 2002. С. 14-21. **48.** Бабкин С.Э., Ильясов Р.С. Кольцевой электромагнитно – акустический преобразователь поверхностных волн // Дефектоскопия. 2002. № 1. С. 78-82. **49.** Горделий В.И., Чабанов В.Е. Исследование работы сфокусированного ЭМА – преобразователя // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2004. №1. С. 29 – 33. **50.** Буденков Г.А., Гуревич Ю. С. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (обзор) // Дефектоскопия. 1981. № 5. С. 5-33. **51.** Горделий В.И. Экспериментальное исследование волн Релея, возбуждаемых ЭМА преобразователями в железнодорожных рельсах // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2004. № 4. С. 41 - 44. **52.** Папушин А.В., Харитонов А.В. Некоторые вопросы теории электромагнитно – акустических преобразователей нормальных волн, имеющих периодическую структуру. – Известия ЛЭТИ, 1975. Вып. 168. С.12-16. **53.** Перов Д.В. Об эффективности электромагнитно – акустического возбуждения волн Лэмба при различной толщине электропроводящего слоя // Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 37-46. **54.** Буденков Г.А., Недзвецкая О.В., Лебедева Т.Н. Эффективность использования стержневых и крутильных волн для контроля пруткового проката // Дефектоскопия. 2004. № 3. С. 3-8. **55.** Комаров В. А., Кононов П. С. Изучение прямого и обратного электромагнитно - акустического преобразования в ферромагнитных стержнях // Дефектоскопия. 1978. с. 20—27. **56.** Никифорова Ж.Г. Методы обработки сигналов фазированной системы ЭМА преобразователей при контроле труб. - Труды конф. 16-я российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика». - Санкт-Петербург, 2002, доклад 4.2.05. **57.** Иванов А.И., Таран В.М., Осипович К.В. и др. Автоматизированная установка неразрушающего контроля труб диаметром 219-325 мм типа «Баллон ЭМА» // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 4. С. 98-99. **58.** Кириков А.В., Забродин А.Н. Чувствительность эхо- и эхо – сквозного методов УЗК листового проката // В мире неразрушающего контроля. 2001. №3 (13). С. 32 – 34. **59.** Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Й. Крауткреммер, Г. Крауткреммер; Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. - 752 с. **60.** Huang Y.D., Froyen L., Wevers M. Quality Control and Nondestructive Tests in Metal Matrix Composites // Journ. of Nondestructive Evaluation. 2001. Vol. 20. N 3. P. 113-132. **61.** Берман Л.И. Ультразвук и его применение в науке и технике / Под ред. В.С. Григорьева и Л.Д. Розенберга. Изд.2. – М.: Иностранная литература, 1957. – 726 с. **62.** Васильев А. И., Гайдуков Ю. П. Электромагнитное возбуждение звука в металлах УФН, 1983, т. 141, вып. 3, с. 431—467. **63.** Dobbs E.R. Electromagnetic Generation of Ultrasound/ Research Techniques in Nondestructive Testing. 1973. V. 2. P. 419-441. Academic Press London and New York. **64.** Маскаев А.Ф. Электромагнитное возбуждение и регистрация ультразвука в ферромагнитных изделиях при высоких температурах: Автореф. канд. дисс Свердловск: ИФМ УНЦ АН СССР, 1976. - 22 с. **65.** Kavashima K. Theory and numerical calculation of the acoustic field produced in metal by an electromagnetic ultrasonic transducer // J. Acoust. Soc. Amer. 1976. 66. № 5. p. 1089—1099. **66.** Паврос С.К., Лапин Ю.В., Иванова Т.А. и др. УЗК листового проката при высоких температурах // В мире НК. 2004. № 3. С. 16-17. **67.** Гурвич А.К., Кириков А.В. О чувствительности ультразвукового контроля листового проката // В мире НК. 2004. № 1. С. 43-46. **68.** Dickhaut E. Rechnergestützte Ultraschallprüfung von Turbinenscheiben // Jahrestag d. DGZfP Essen. 1984. Vortrag

№ 35. P. 881-890. **69.** *Wallace W.D.* Electromagnetic generation of ultrasound in metals // Int. Non Destr. Test. 1971. № 2. P. 309 – 334. **70.** *Grubin H.L.* Direct electromagnetic generation of compressional waves in metals in static magnetic fields // IEEE Trans. SU-17 (1970). P. 227 – 229. **71.** *Кавашима К., Мурота С.* Электромагнитное генерирование ультразвуковых волн в отсутствие внешнего магнитного поля и использование этих волн в сталелитейной промышленности. – Доклад на международной конференции по неразрушающему контролю. Мельбурн. 1979. доклад 4Н-3. С.1-8. (Перевод № КГ-72611). **72.** *Никифорова Ж. Г., Булаев А.Н., Ясер В.* и др. УЗК трубопроводов с изоляционными покрытиями с применением ЭМА – преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 2. С. 42-45. **73.** *Кириков А.В., Забродин А.Н., Комлик А.В.* Методы и средства ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно – акустических преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 1999. № 3. С. 18 – 20. **74.** *Глухов Н.А.* Электромагнитно – акустические преобразователи для упругих волноводов // Дефектоскопия. 1972. № 4. С. 38 – 44. **75.** *Бобренко В. М.* Исследование напряжений с использованием электромагнитно – акустических преобразователей // Дефектоскопия. 1971. № 3 С. 132—134. **76.** *Малинка А. В.* Электромагнитно – акустический метод контроля ферромагнитных листов и труб // Дефектоскопия. 1972. № 4. С. 44—48. **77.** *Эйчина В. Г., Кеслер Н. А.* Влияние магнитного поля на затухание ультразвуковых колебаний // Дефектоскопия. 1973. № 3. С. 53—58. **78.** *Cole P.* The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel, at high temperatures // Ultrasonic. 1978. № 4 (16) P. 151 — 155. **79.** *Гарькавый В.В., Сучков Г. М.* Требования к следящему устройству установки ЭМА дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 1988. № 5. С. 19-22. **80.** *Kawashima K., McClung R.* Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radially polarized transverse wave) // Mater. Eval. 1976. V. 34. № 4. P. 81—90. **81.** *Абакумов К.Е.* Сравнительная характеристика выявляемости расслоений продольными и поперечными волнами // Дефектоскопия. 1988. № 3. С. 28 – 36. **82.** *Гусев Е. А., Королев М. В., Карпельсон А. Е.* и др. Приборы неразрушающего контроля толщины в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1993. – 144 с. **83.** *Бутенко А. И., Малинка А.В., Стефоров В.И.* и др. Толщинометрия труб импульсным электромагнитно – акустическим методом // Дефектоскопия. 1973. № 3. С. 7 – 11. **84.** *Буденков Г.А., Маскаев А.Ф.* Возможность контроля стальных изделий электромагнитно – акустическим методом без удаления окалины // Дефектоскопия. 1972. № 5. С. 83—87. **85.** ТУ 14-2-542-83. Рельсы объемно-закаленные Р65, проконтролированные ультразвуковым электромагнитно- акустическим методом в зоне, ограниченной толщиной шейки. Технические условия. Харьков: УкрНИИМет, 1983. – 9 с. **86.** 44. ТУ 14-2-584-84. Рельсы железнодорожные нетермообработанные и поверхностно- закаленные, проконтролированные ультразвуковым методом в зоне, ограниченной толщиной шейки. Технические условия. Харьков: УкрНИИМет, 1983. – 8с. **87.** 45. ТУ У 14-2-1199-97. Рельсы железнодорожные нетермообработанные и поверхностно- закаленные, проконтролированные ультразвуковым методом в зоне, ограниченной толщиной шейки. Технические условия. Харьков: УкрНИИМет, 1997. – 14 с. **88.** *Малинка А.В.* Изучение и прием ультразвуковых колебаний под заданным углом при электромагнитно – акустическом методе // Дефектоскопия. 1970. № 5. С. 16—20. **89.** *Малинка А.В., Неволин О.В., Пачковский Л.С.* Возбуждение и регистрация ультразвуковых колебаний ЭМА методом. — В кн.: Неразрушающие физические методы и средства контроля. Кишинев: ВНИИНК, 1977, д. 01/113, с. 421—424. **90.** *Mogan T., Panos R.* Electromagnetic generation of electronically steered ultrasonic bulk waves // J. Appl. Phys. 1976. № 5. (47). P. 2225. **91.** Электромагнитно – акустический дефектоскоп УД-ЭМА-РО-2 для контроля железнодорожных рельсов в условиях низких температур // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2004. № 4. С. 64-65. **92.** *Неволин О.В., Иванов А.И., Астафьев А.Н.* и др. Электромагнитно – акустический дефектоскоп - толщиномер. – В сб.: «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики». – Харьков: ХИРЭ, 2003. С. 13-15. **93.** *Palmer S.B., Dixon S.* Industrially viable non-contact ultrasound. – Insight. 2003.V. 45. No. 3. P. 211 – 217. **94.** *Власов В.В., Лончак В.А., Глухов Н.А.* и др. Ультразвуковой контроль железнодорожных рельсов, уложенных в путь, с использованием электромагнитно – акустических преобразователей // Дефектоскопия. 1971. № 3. С. 94 – 98. **95.** *Khalid A.* Insight. 2002. V. 44. N 3. H. 166-178. **96.** *Чабан С.В.* О системе и перспективах НК качества рельсов на Кузнецком металлургическом комбинате // В мире НК. 2001. № 4. С. 58-60.

**97.** *Чабан С.В.* Тезисы по вопросам неразрушающего контроля рельсов на ОАО «Кузметкомбинат». - В сб. Материалы рельсовой комиссии – 2000. - Нижний Тагил. 2000. С. 93 – 95. **98.** *Горделый А.И.* Конструкция и особенности работы ЭМА - систем УД-ЭМА-РСП-01, работающих в установках для контроля старогонных рельсов. - В сб. Материалы н. – т. конференции “Неруйнівний контроль та технічна діагностика – 2003”. Київ. 2003. С. 318 – 320. **99.** *Волегов Ю.В., Гальцев Ю.Г., Усов И.А.* Импульсный бесконтактный дефектоскоп клеевых соединений ДУИБ-2. – Информ. лист. № 113-74. Челябинск: ЦНТИ. 1974. С. 1 – 4. **100.** *Шоповалов П.Ф.* Приставка «Ритм - 1» к универсальным ультразвуковым дефектоскопам // Дефектоскопия. № 3. 1972. С.125. **101.** *Рускевич Ю.Н., Пачковский Л.С., Неволин О.В.* Экспериментальные исследования по повышению чувствительности ЭМА метода при контроле наружных и внутренних дефектов заготовок круглого сечения. – В кн. Неразрушающие физические методы и средства контроля. Кишинев: ВНИИНК, 1977. С. 414 – 417. **102.** *Гуревич С.Ю., Гальцев Ю.Г.* Бесконтактная УЗ система «Сирена-2» для контроля качества проката // Научные достижения. 1989. № 5. С. 70-72. **103.** *Whittington K.R.* Ultrasonic testing at high temperatures // Phys. Techn. 1978. N 2. P. 62-67. **104.** А.с. 1373149 СССР, МКИ G01N29/04. Способ настройки электромагнитно – акустического дефектоскопа // Сучков Г.М., Гарькавый В.В., Полосухина О.А. и др. 1987. **105.** А.с. 1457586 СССР, МКИ G01N29/04. Способ настройки установки электромагнитно – акустической дефектоскопии // Левченко Н.Ф., Скобло Т.С., Сучков Г.М. и др. 1986. **106.** *Себко В.П., Сучков Г.М., Горкунов Б.М.* Практический контроль поверхности металлоизделий электромагнитно – акустическим (ЭМА) способом. – В сб. «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики». - Харьков. 2003. С. 26-27. **107.** *Сучков Г.М.* Разработка приборов для неразрушающего контроля ЭМА способом. – В сб. «Информационные материалы 5-го международного семинара-выставки «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики». - Харьков. 2004. С. 7-12. **108.** ГСТУ 32.2.04.001-2000 Дефектоскопи ультразвукові для контролю рейок при їх експлуатації. Технічні вимоги. – Київ: Укралізниця. – 16 с. **109.** *Судакова К.В., Казюкевич И.Л.* О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире НК. 2004. № 3. С. 8-10. **110.** Акулов М.П. Безопасность движения поездов // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 3. С. 69 – 70. **111.** *Сучков Г. М.* Обработка информации. Возможности корреляционного анализа при толщинометрии ЭМА методом. - Контроль. Диагностика. 2002. № 8. С. 37 - 40. **112.** *Сучков Г.М.* Обработка информации. Повышение возможностей корреляционного анализа в ЭМА - приборах // Контроль. Диагностика. 2004. № 12. С. 13-16. **113.** *Сучков Г.М.* Возможности линейной частотной фильтрации в ЭМА - приборе // Контроль. Диагностика. 2004. № 10. С. 20-21. **114.** *Сучков Г.М.* Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів. Автореф. дис. д.т.н., Харків, НТУ «ХПІ», 2005 - 37 с. **115.** *Петрищев О. Н.* Теоретичні основи розрахунку та проектування ультразвукових перетворювачів електромагнітного типу. Автореф. дис. д.т.н., Київ, НТУУ «КПІ», 2009, 36 с. **116.** *Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А.* К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. IV. Обратное и двойное ЭМАП в тангенциальном поляризующем поле // Дефектоскопия, 2007, № 2, с. 35—52. **117.** *Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А.* К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. III. Обратное и двойное ЭМАП в тангенциальном поляризующем поле // Дефектоскопия, 2007, № 1, с. 64—79. **118.** *Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А.* К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. II. Прямое ЭМАП в тангенциальном поляризующем поле. // Дефектоскопия. 2006. №11. С. 14-28. **119.** *Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А.* К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. I Прямое ЭМАП в нормальном поляризующем поле. // Дефектоскопия. 2006. №10. С. 40 - 57. **120.** *Сучков Г.М., Донченко А.В., Десятниченко А.В.* и др. Повышение чувствительности ЭМА приборов. – Дефектоскопия. 2008. №2. С. 15-22. **121.** *Сучков Г.М., Донченко А.В.* Реальная чувствительность ЭМА приборов // Дефектоскопия, 2007, №6, с. 43-50. **122.** *Сучков Г.М., Алексеев Е.А., Захаренко В.В.* Энерго- и ресурсосберегающие приборы и технологии неразрушающего контроля // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, Киев, 2006, № 4, с. 29-34.